



## 北冰洋中部阿尔法脊晚第四纪介形虫化石群与古海洋环境变迁

王雨楠, 周保春, 王汝建, 肖文申

### Late Quaternary paleoceanographic history of the Alpha Ridge, central Arctic Ocean based on ostracode records

WANG Yunan, ZHOU Baochun, WANG Rujian, and XIAO Wenshen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021601>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

#### 江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

#### 海洋地质与第四纪地质的结合

Marine geology and Quaternary geology: A combination

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 1

#### 珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

#### 科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1

#### 《海洋地质与第四纪地质》创刊40周年优秀作者与优秀审稿专家名单

#{suggestArticle.titleEn}

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 231



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王雨楠, 周保春, 王汝建, 等. 北冰洋中部阿尔法脊晚第四纪介形虫化石群与古海洋环境变迁 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 39-49.

WANG Yunan, ZHOU Baochun, WANG Rujian, et al. Late Quaternary paleoceanographic history of the Alpha Ridge, central Arctic Ocean based on ostracode records [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 39-49.

# 北冰洋中部阿尔法脊晚第四纪介形虫化石群与古海洋环境变迁

王雨楠<sup>1</sup>, 周保春<sup>1</sup>, 王汝建<sup>2</sup>, 肖文申<sup>2</sup>

1. 上海自然博物馆(上海科技馆分馆), 上海 200041

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

**摘要:** 基于北冰洋中部阿尔法脊 ARC3-B84A 岩芯 (水深 2280 m) 中的介形虫化石群记录, 重建了 MIS 13 期以来该海域的古海洋环境变迁。从该岩芯获取的介形虫壳瓣逾 7000 枚, 包含 8 属 11 种。由介形虫丰度所代表的底栖生物古生产力在 MIS 13-10 期很低, 进入 MIS 9 期之后显著升高。海冰指示种 *Acetabulastoma arcticum* 显示常年海冰很可能是在 MIS 9 期之后出现的。在所有属种中, 北冰洋中层水 (AIW) 指示种 *Polycope* spp. 和北冰洋深层水 (AODW) 指示种 *Cytheropteron sedovi* 的个体数量最多, 二者在岩芯中的百分含量呈负相关, 它们与其他属种 (*Microcythere medistriatum*, *Pseudocythere caudata*, *Pedicythere* spp., *Cytheropteron scoresbyi*, *Cytheropteron higashikawai*, *Henryhowella asperrima*) 一起, 揭示该岩芯站位经历了如下的水团变迁历史: 最初处于 AODW 上部 (MIS 13-12), 之后被上涌的 AODW 下部所取代 (MIS 11-10); 尔后, 上方的 AIW 大幅下潜, 取代了 AODW (MIS 9 期-MIS 5 早期); 在 MIS 5 中-晚期, AODW 下部快速上涌, 取代了 AIW; 最终在 MIS 4 之后, 水团定格在 AODW 上部。

**关键词:** 介形虫; 古海洋环境变迁; 北冰洋中部; 阿尔法脊; 晚第四纪

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022021601

## Late Quaternary paleoceanographic history of the Alpha Ridge, central Arctic Ocean based on ostracode records

WANG Yunan<sup>1</sup>, ZHOU Baochun<sup>1</sup>, WANG Rujian<sup>2</sup>, XIAO Wenshen<sup>2</sup>

1. Shanghai Natural History Museum (Branch of Shanghai Science and Technology Museum), Shanghai 200041, China

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** The paleoceanographic history of the central Arctic Ocean since Marine Isotope Stage (MIS) 13 was reconstructed based on ostracode assemblages in a gravity core from the Alpha Ridge (modern water depth 2280 m). Over 7000 ostracode valves, including 8 genera and 11 species, were obtained from the core. The biological productivity, as represented by ostracode abundance, is low during MIS 13-10 but is markedly high throughout MIS 9-1. The distribution of *Acetabulastoma arcticum*, a sea ice-dwelling species, indicates that perennial sea ice was probably absent during MIS 13-9. The ostracode assemblages are predominated by *Polycope* spp. (an indicator of Arctic Intermediate Water, AIW) and *Cytheropteron sedovi* (an indicator of Arctic Ocean Deep Water, AODW), and are accompanied by *Microcythere medistriatum*, *Pseudocythere caudata*, *Pedicythere* spp., *Cytheropteron scoresbyi*, *Cytheropteron higashikawai*, and *Henryhowella asperrima*. The relative frequencies (%) of *Polycope* spp. and *Cytheropteron sedovi* show inverse correlation throughout the core. The reconstructed paleo-watermass history is as follows: initially, the core site was occupied by the upper part of AODW (MIS 13-12) and lower part of AODW (MIS 11-10); after then, the overlying AIW shifted downward and took the place of AODW (MIS 9-early MIS 5); later, the lower part of AODW shifted up rapidly (middle to late MIS 5) and finally the upper part of AODW came to settle down at the site (MIS 4-1).

**Key words:** ostracode; paleoceanographic history; central Arctic Ocean; Alpha Ridge; Late Quaternary

**资助项目:** 国家自然科学基金面上项目“中更新世以来西北冰洋深海氧化-还原环境的变化及其对碳循环的指示”(42176223); 上海市自然科学基金“北冰洋全新世—晚第四纪介形类动物群及古气候复原”(14ZR1427600); 中国科学院战略先导基金“关键地史时期生物与环境演变过程及其机制”(XDB26000000)

**作者简介:** 王雨楠(1984—), 女, 助理研究员, 主要从事早寒武纪节肢动物及第四纪介形虫研究, E-mail: wangyn@sstm.org.cn

**通讯作者:** 周保春(1963—), 男, 研究员, 主要从事新生代介形虫分类、进化及古海洋学研究, E-mail: zhoubch@sstm.org.cn

王汝建(1959—), 男, 教授, 主要从事海洋地质学、古海洋学与古气候学研究, E-mail: rjwang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2022-02-16; 改回日期: 2022-03-17. 周立君编辑

北冰洋被高耸的洋中脊——罗蒙诺索夫脊分隔为东、西两部分。现代北冰洋的显著特点之一是海水的分层结构<sup>[1]</sup>,它拥有以下四大主要水团:极地表层水(PSW,水深0~50 m,水温-2~0 °C,盐度32~34 psu),大西洋水(AW,水深200~1000 m,水温 $\geq 0$  °C,盐度34.3~34.8 psu),北冰洋中层水(AIW,水温-0.5~0 °C,盐度34.6~34.8 psu),以及北冰洋深层水(AODW);AODW分为加拿大海盆深层水(CBDW,水深>1500 m,水温-0.5~-0.3 °C,盐度34.95 psu)和欧亚海盆深层水(EBDW,水深>2000 m,水温-1.0~-0.6 °C,盐度34.94 psu)<sup>[2-5]</sup>。AW和PSW被一层发育良好的盐跃层(水深<200 m)所分隔<sup>[6]</sup>。温度和盐度较高的北大西洋水体经由弗拉姆海峡和巴伦支海流入北冰洋,潜入相对低盐的盐跃层之下并逆时针流动<sup>[4,7]</sup>,形成了位于中层的AW和AIW<sup>[8]</sup>,因此北大西洋是北冰洋重要的热量和盐分供给源。在北冰洋,大尺度的表层洋流有从西伯利亚陆架流向弗拉姆海峡的穿极洋流,以及加拿大海盆的波弗特环流(图1a)。北冰洋从欧亚大陆和北美大陆接受了约占全球总量10%的淡水流量<sup>[9]</sup>,而波弗特环流夹裹了大量的淡水<sup>[10-12]</sup>。阿尔法脊的表层水被常年海冰所覆盖<sup>[13]</sup>,同时也处于波弗特环流的影响之下。

Haley等<sup>[14]</sup>对北冰洋岩芯中的钕同位素分析结果显示,北冰洋海水的分层格局形成于早更新世,但中层水体(包括AW和AIW)的性质随气候而变化:间冰期,中层水体主要来自北大西洋中层水的贡献,而冰期则主要来自于在欧亚大陆架上形成的卤水。另一方面,Cronin等<sup>[15]</sup>利用介形虫壳体Mg/Ca古温度计重建了50 ka以来北冰洋的水团变化历史,得出了末次冰期中盐跃层增厚,AW在整个北冰洋均向下被挤压到1000~2500 m深度的著名结论。然而,我们发现Cronin等的结论虽然可以很好地解释末次冰期中介形虫化石群在北冰洋罗蒙诺索夫脊以东的分布方式,却无法解释它们在罗蒙诺索夫脊以西的分布。

介形虫是北冰洋微体化石的重要门类之一。Gemery等<sup>[16]</sup>基于整个北冰洋1000多个表层沉积样数据而建立的北冰洋介形虫数据库(Arctic Ostracoda Database, AOD)表明,介形虫属种与海洋环境之间存在着明确的对应关系。自20世纪80年代以来,介形虫在北冰洋新近纪—第四纪古海洋学中的应用越来越多,揭示了介形虫化石群与古气候事件的关联性<sup>[17]</sup>。在过去几年里,本文作者对中国北极科学考察期间“雪龙号”科考船在西北冰洋楚

科奇海台一带钻取的3根岩芯(水深<1000 m)中的介形虫及部分底栖有孔虫属种进行详细研究,并对前人的北冰洋介形虫化石数据<sup>[18-19]</sup>进行重新分析后,得出了如下结论:在包括末次冰期在内的MIS 5-2期,AW在西北冰洋并非迁移到更深水域,而是因受罗蒙诺索夫脊的阻隔而变弱甚或消失了<sup>[17,20]</sup>。

我们的上述结论是对Cronin等<sup>[15]</sup>结论的重要修正,揭示了气候寒冷期里东、西北冰洋迥异的水体结构,它有待更多的研究来进一步证实。这同时也衍生出了新的科学问题:在更深水域中,北冰洋的水团是否也随气候冷暖交替而发生变化?作为解答这一问题的第一步,本研究选取了中国第三次北极科学考察期间在北冰洋中部阿尔法脊采取的岩芯ARC3-B84A(站位水深2280 m),对其中的介形虫化石群进行了详细分析。研究内容包含两个方面:首先,基于北冰洋介形虫数据库(AOD)<sup>[16]</sup>,对ARC3-B84A岩芯中介形虫主要属种在现代北冰洋的生态分布,尤其与水团的对应关系进行了分析;然后,根据主要属种在该岩芯中的时代分布,重建了MIS 13期以来深部水团在阿尔法脊一带海域的变迁历史。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究材料

本研究材料来自中国第三次北极科学考察<sup>[21]</sup>于2008年夏季在阿尔法脊采集的ARC3-B84A岩芯(以下简称B84A岩芯)。该岩芯长188 cm,站位水深2280 m,位于AODW上部;与之相比较,用于西北冰洋中层水团研究的3根岩芯(ARC3-P31、ARC6-R14及ARC7-P12)<sup>[17]</sup>均采自楚科奇海台,站位处于现代北冰洋AW之内(图1,表1)。

### 1.2 研究方法

本研究采用标准微体古生物学分析方法对B84A岩芯沉积物样品进行处理。岩芯按2 cm间隔取样,共获得94个样品。在同济大学海洋地质国家重点实验室,将分割的样品用烘箱烘干、称重,然后经水泡分散后,用孔径63  $\mu\text{m}$ 的铜筛水洗。将>63  $\mu\text{m}$ 的屑样烘干后,再用孔径150  $\mu\text{m}$ 的筛子干筛。在体视显微镜下,将>150  $\mu\text{m}$ 屑样中的介形虫个体全部挑出用于属种鉴定统计分析。本文主要采用Yasuhara等<sup>[25]</sup>、Gemery等<sup>[16]</sup>作为北冰洋介形虫分类鉴定标准。此外,利用同济大学海洋地质国

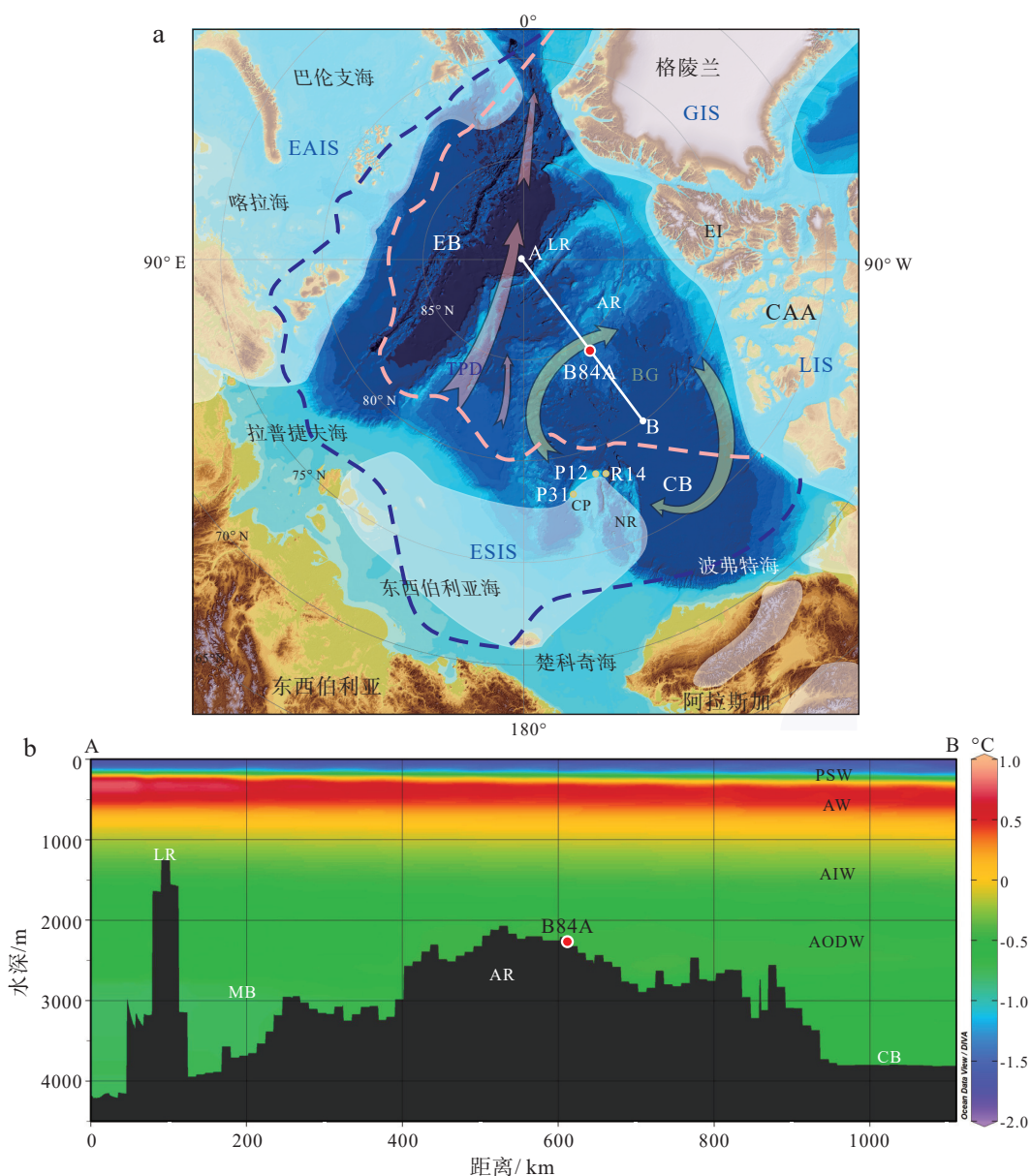


图 1 西北冰洋阿尔法脊 B84A 岩芯平面位置 (a) 以及在海洋水团中的位置 (b)

淡黄色圆点表示本文提及的其他 3 个岩芯站 (详细信息见表 1)。蓝色和粉红色点线分别表示 1979—2006 年间的平均海冰范围及近年 (2012 年数据) 最小海冰范围<sup>[22]</sup>, 浅白色阴影部分表示推定的更新世冰盖范围<sup>[23-24]</sup>。EAIS-欧亚冰盖, GIS-格陵兰冰盖, LIS-劳伦太德冰盖, ESIS-东西伯利亚冰盖, EI-埃尔斯米尔岛, CAA-加拿大北极群岛, CB-加拿大海盆, EB-欧亚海盆, MB-马卡罗夫海盆, AR-阿尔法脊, LR-罗蒙诺索夫脊, CP-楚科奇海台, NR-北风脊, BG-波弗特环流, TPD-穿极洋流, PSW-极地表层水, AW-大西洋水, AIW-北冰洋中层水, AODW-北冰洋深层水。

Fig.1 Location of core B84A in a map view (a) and cross section (b)

Section runs from the Eurasian Basin at point A, across to the Canada Basin at point B. The location where the core B84A was drilled is marked by red circle with white outline, and other cores mentioned in this paper are represented by light yellow circles (see Table 1 for more core information). Blue and pink dashed lines indicate climatological average (1979 to 2006) and recent minimum (2012) September sea ice extent, respectively<sup>[22]</sup>. Light shaded areas indicate tentative extent of Pleistocene glaciations around the Arctic Ocean<sup>[23-24]</sup>. Abbreviations: EAIS (Eurasian Ice Sheet), GIS (Greenland Ice Sheet), LIS (Laurentide Ice Sheet), ESIS (East Siberian Ice Sheet), EI (Ellesmere Island), CAA (Canadian Arctic Archipelago), CB (Canada Basin), EB (Eurasia Basin), MB (Makarov Basin), AR (Alpha Ridge), LR (Lomonosov Ridge), CP (Chukchi Plateau), NR (Northwind Ridge), BG (Beaufort Gyre), TPD (Transpolar Drift), PSW (Polar Surface Water), AW (Atlantic Water), AIW (Arctic Intermediate Water), and AODW (Arctic Ocean Deep Water).

家重点实验室的扫描电子显微镜 (TESCAN Mira 3) 对介形虫标本进行观察并拍摄照片。

本研究计算了每个样品中的介形虫丰度 (每克干样中介形虫的壳瓣数), 因为它反映了底栖生物

表 1 本研究使用的岩芯及其信息汇总  
Table 1 Information for all the cores used in this study

岩芯	海域	纬度 (N)	经度 (W)	水深/m	来源
ARC3-B84A	阿尔法脊	84°26.5'	143°34.8'	2280	本文
ARC3-P31	楚科奇海台	77°59.9'	168°00.7'	435	文献[17]
ARC6-R14	楚科奇海台	78°38.3'	160°26.8'	741	文献[17]
ARC7-P12	楚科奇海台	78°17.2'	162°41.3'	580	文献[17]

古生产力变化; 计算了常见属种在每个样品中的个体数量百分比, 以便复原古水团变迁。介形虫个体数用单瓣数来表示, 1个合瓣计为2个单瓣。在计算各属种的百分比时, 为了减少误差, 本文将个体数量较少的相邻样品合并起来, 以使合并后的瓣数大于50。

为了准确把握介形虫属种的水深分布及其与水团的对应关系, 本文使用软件 Ocean Data View (ODV)<sup>[26]</sup> 分析了 B84A 岩芯中的常见种在现代北冰洋的分布。共计选取了北冰洋 638 个表层沉积物样品的介形虫数据, 并将数据输入 ODV 软件绘制各个属种在现代北冰洋的丰度等值线断面图。这些样品由 AOD<sup>[16]</sup> 的 1340 个样品中的 626 个, 以及我们自己拥有的 231 个西北冰洋样品中的 12 个构成, 每个样品都包含了 50 个以上介形虫个体。

## 2 地层年代框架

B84A 岩芯沉积物主要由粉砂质黏土构成。Wang 等<sup>[27]</sup> 综合运用 AMS<sup>14</sup>C 测年、层序对比、旋回地层学校准等方法, 建立了该岩芯可靠的年代框架。具体步骤如下: 首先基于 AMS<sup>14</sup>C 测年、Ca 和 Mn 元素峰值、地层标志种的分布等, 确定氧同位素期次; 然后把 B84A 岩芯的 Ca 和 Mn 的 stack 与 LR04 深海氧同位素曲线<sup>[28]</sup> 对比, 确定年龄控制点后转换为深度-年龄模式; 最后分别通过“插值法”获得每个 2 cm 间隔岩芯样品的年龄。根据年龄模式, 该岩芯包含了 MIS 1 期及 MIS 3-13 期的沉积记录, MIS 2 期缺失。

## 3 结果及讨论

### 3.1 B84A 岩芯中的介形虫及其生态特性

阿尔法脊 B84A 岩芯中介形虫化石数量丰富, 从 94 个样品中共挑出介形虫 7011 瓣, 鉴定出 8 属 11 种。化石群的优势种为 *Polycope* spp. (占总个体

数量的 52.2%) 和 *Cytheropteron sedovi* Schneider 1969 (占 20.7%), 常见种为 *Cytheropteron scoresbyi* Whatley and Coles 1987 (占 4.9%)、*Acetabulastoma arcticum* Schornikov 1970 (占 7.0%)、*Henryhowella asperriima* (Reuss 1850) (占 5.5%)、*Microcythere medistriatum* Joy and Clark 1977 (占 1.8%)、*Pseudocythere caudata* Sars 1866 (占 1.9%)、*Cytheropteron higashikawai* Ishizaki 1981 (占 1.8%) 以及 *Pedicythere* spp. (占 1.0%)。有趣的是, 北冰洋深海介形虫的代表属之一 *Krithe*<sup>[17-19]</sup>, 在该岩芯中仅发现 6 瓣; 而北冰洋大西洋水 (AW) 的指示者 *Cytheropteron perlaria* Hao 1988<sup>[17]</sup>, 在该岩芯中仅出现 1 瓣 (42~44 cm 孔深处)。图 2 为部分属种的扫描电子显微镜照片。

基于来自北冰洋 638 个表层沉积物样品的介形虫数据, 本文分析了 B84A 中的 2 个优势种和 7 个常见种在现代北冰洋的分布, 以便确定它们与海洋环境、尤其与水团的对应关系。9 个属种的百分含量等值线图用 ODV 绘制, 投影在连接加拿大海盆和巴伦支海的横断面上; 同时还绘制了介形虫百分含量-水深散点图 (图 3), 为介形虫属种与特定海洋环境的对应关系提供了新认知。9 个属种与现代北冰洋水团的对应关系归纳如下 (表 2)。

(1) 北冰洋中层水 (AIW) 属种: *Polycope* spp.、*Pseudocythere caudata* 和 *Pedicythere* spp. 的百分含量在 1 000~2 000 m 水深范围内 (即 AIW 内) 最高, 但在该深度以上和以下明显降低 (图 3a, c, d; 表 2)。

*Polycope* spp. 营底栖生活, 它们在北冰洋代表着一类机会种, 在合适的环境中能够快速繁衍<sup>[29-30]</sup>。以往的研究已经发现 *Polycope* 与 AIW 之间存在着对应关系, 并将其应用于古海洋学研究<sup>[17-19, 29, 31-32]</sup>。本研究对现代北冰洋数据的分析结果, 再次证实了该属对 AIW 的适应性。

*Pseudocythere caudata* 最早发现于北大西洋的潮下带<sup>[33]</sup>, 但是它在北冰洋栖息的水深范围达到 3 000 m, 且主要分布在 AIW 中。以前的研究已经发现 *P. caudata* 与 *Polycope* spp. 在化石群中存在着共现关系<sup>[29, 34]</sup>, 并发现该种偏好 AIW 和 AODW<sup>[17, 19]</sup>。

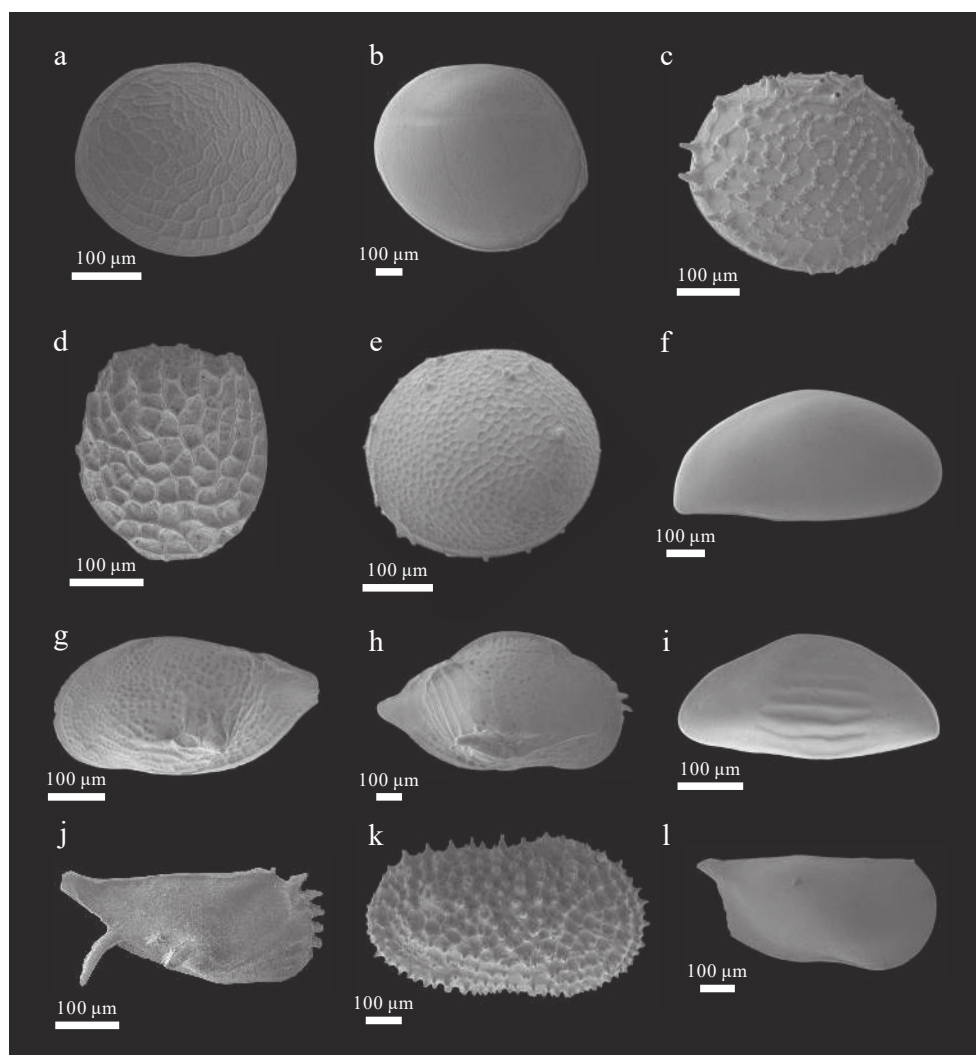


图 2 阿尔法脊 B84A 岩芯中介形虫标本扫描电子显微镜照片

a. *Polycope biretculata* Joy and Clark 1977, 右壳瓣; b. *Polycope inornata* Joy and Clark 1977, 右壳瓣; c. *Polycope horida* Joy and Clark 1977, 右壳瓣; d. *Polycope moenia* Joy and Clark 1977, 右壳瓣; e. *Polycope arcys* Joy and Clark 1977, 左壳瓣; f. *Acetabulastoma arctium* Schornikov 1970, 左壳瓣; g. *Cytheropteron scoresbyi* Whatley and Coles 1987, 左壳瓣; h. *Cytheropteron sedovi* Schneider 1969, 右壳瓣; i. *Microcythere medistriatum* Joy and Clark 1977, 左壳瓣; j. *Pedicythere neofluitans* Joy and Clark 1977, 右壳瓣; k. *Henryhowella asperrima* (Reuss 1850), 右壳瓣; l. *Pseudocythere caudata* Sars 1866, 右壳瓣。

Fig.2 SEM photographs of ostracodes from core B84A

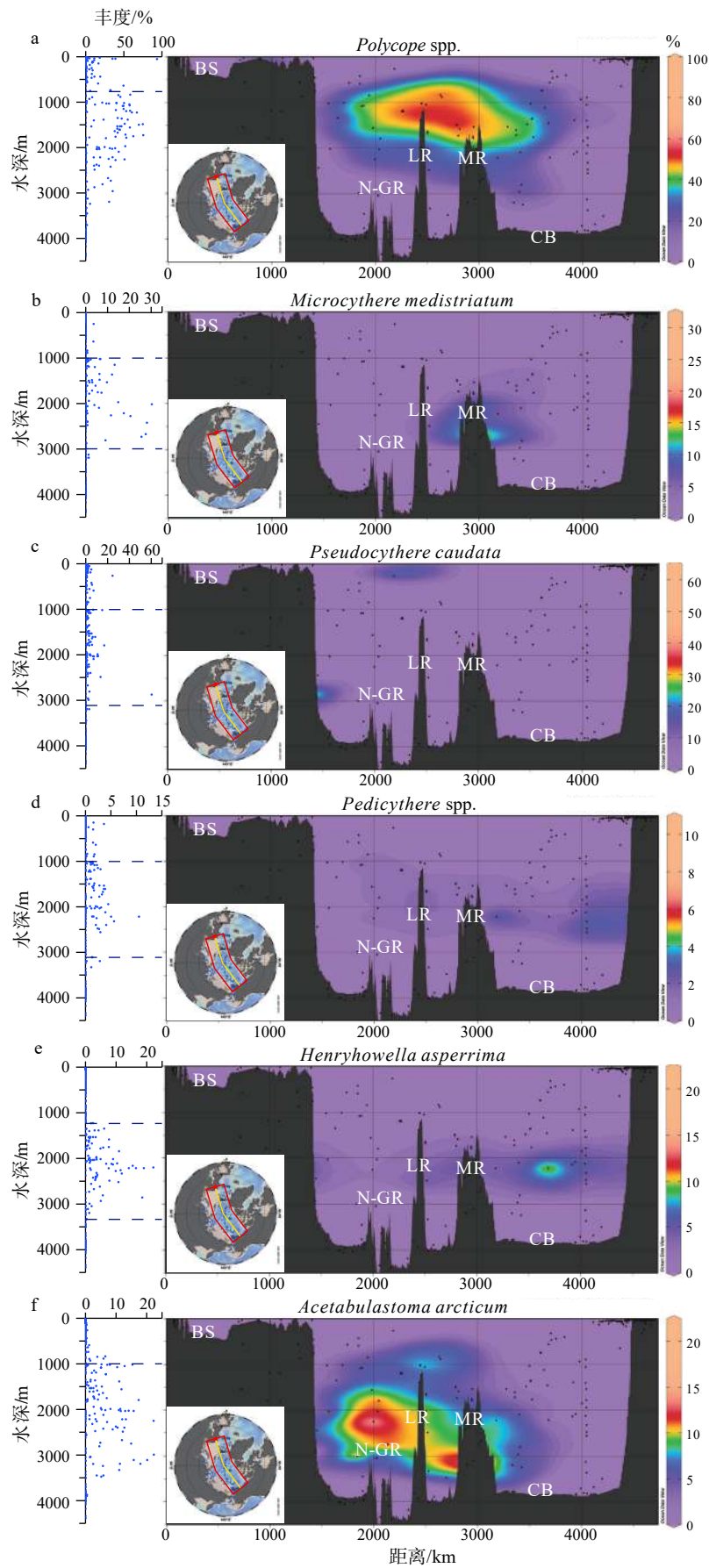
a. *Polycope biretculata* Joy and Clark 1977, RV; b. *Polycope inornata* Joy and Clark 1977, RV; c. *Polycope horida* Joy and Clark 1977, RV; d. *Polycope moenia* Joy and Clark 1977, RV; e. *Polycope arcys* Joy and Clark 1977, LV; f. *Acetabulastoma arctium* Schornikov 1970, LV; g. *Cytheropteron scoresbyi* Whatley and Coles 1987, LV; h. *Cytheropteron sedovi* Schneider 1969, RV; i. *Microcythere medistriatum* Joy and Clark 1977, LV; j. *Pedicythere neofluitans* Joy and Clark 1977, RV; k. *Henryhowella asperrima* (Reuss 1850), RV; l. *Pseudocythere caudata* Sars 1866, RV.

*Pedicythere* 属在北冰洋有两个种, 即 *P. neofluitans* Joy and Clark 1977 和 *P. arctica* Yasuhara et al. 2014。该属零星分布于 100~3400 m 水深范围, 百分含量通常小于 2%, 最大丰度出现于 1000~2000 m 水深范围, 即 AIW 内。

(2) 北冰洋深层水 (AODW) 属种: *Cytheropteron sedovi*、*Henryhowella asperrima* 以及 *C. higashikawai* 的百分含量在 >2000 m 水深范围 (即 AODW 内) 最

高, 而在其他水深范围内明显降低 (图 3h, e, i; 表 2)。在 AODW 内, *C. sedovi* 和 *C. higashikawai* 主要分布于 >3000 m 水深范围, 显示它们适应 AODW 下部; 而 *H. asperrima* 则主要分布于 2000~3000 m 范围, 说明该种适应 AODW 上部环境。

(3) 北冰洋中层水和深层水 (AIW & AODW) 属种: 在 >1000 m 水深范围 (即 AIW 和 AODW 内), *Microcythere medistriatum* 和 *Cytheropteron scoresbyi*



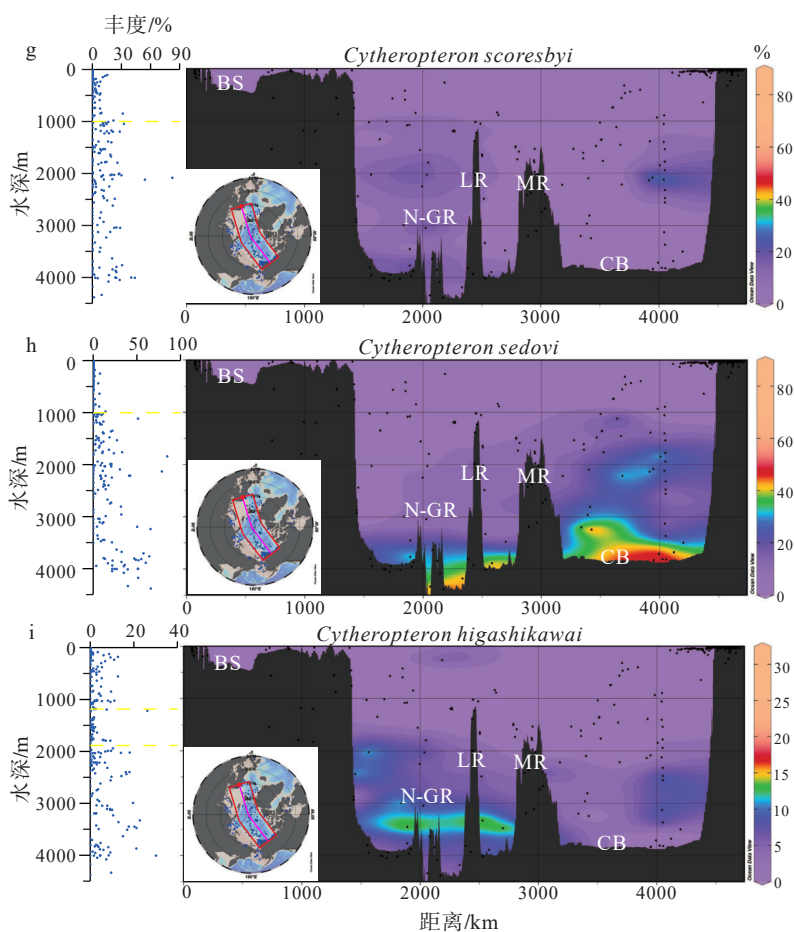


图 3 B84A 岩芯中介形虫主要属种在现代北冰洋的分布  
BS: 巴伦支海, N-GR: 南森-迦凯脊, LR: 罗蒙诺索夫脊, MR: 门捷列夫脊, CB: 加拿大海盆。

Fig.3 Distribution of key ostracode taxa in modern Arctic Ocean

Abbreviations: BS (Barents Sea), N-GR (Nansen-Gakkell Ridge), LR (Lomonosov Ridge), MR (Mendeleev Ridge), CB (Canada Basin).

表 2 B84A 岩芯中的介形虫优势种和常见种在现代北冰洋各水团中的百分含量

Table 2 Relative frequencies (%) of ostracode taxa, which are abundant or common in core B84A, in the Arctic water masses

种名	0~50 m (PSW)	50~200 m (盐跃层)	200~1000 m (AW)	1000~2000 m (AIW)	>2000 m (AODW)
<i>Polycopse</i> spp.	0.38	1.47	8.44	<b>32.67</b>	6.82
<i>Microcythere medistriatum</i>	0	0	0.20	<b>2.07</b>	<b>1.92</b>
<i>Pseudocythere caudata</i>	0.03	0.35	1.39	<b>2.78</b>	1.67
<i>Pedicythere</i> spp.	0	0.05	0.21	<b>1.12</b>	0.64
<i>Henryhowella asperrima</i>	0	0	0	1.42	<b>2.90</b>
<i>Cytheropteron scoresbyi</i>	0	0.39	3.64	<b>8.05</b>	<b>10.47</b>
<i>Cytheropteron sedovi</i>	0	0.02	1.11	9.72	<b>19.16</b>
<i>Cytheropteron higashikawai</i>	0	0.42	2.31	2.97	<b>5.80</b>

的百分含量一直保持较高值,而在 <1000 m 水深则明显降低(图 3b, g; 表 2)。本研究的结果与之前的研究结论<sup>[17]</sup>一致,即 *M. medistriatum* 和 *C. scoresbyi* 偏好 AIW 和 AODW。

*Acetabulastoma arcticum* 的现生分布仅限于北

冰洋中央水域,其百分含量不超过 10%(图 3f)。该种是一个特例,因为它并非底栖种,而是附着在端足类 *Gammarus wilkitzkii* 体表的寄生种,这种端足类在整个生活史都处于北冰洋海冰卤水通道(brine channels)及融化穴(melting holes)中。因此,A.



*arcticum* 被视作北冰洋及周边海域常年海冰的指示种<sup>[16, 30, 35]</sup>, 它的分布与水团无关。

以上结果表明, B84A 岩芯中的 9 个介形虫优势属种和常见属种中, 除 *A. arcticum* 之外, 其余 8 个属种的现生分布均与北冰洋特定的水团相关联, 因此可以用于古水团重建的研究。

### 3.2 MIS 13 期以来介形虫化石群变化特征及其影响因素

#### 3.2.1 古生产力与海冰变化

B84A 岩芯的 94 个样品中, 介形虫平均丰度为 2.9 瓣/g, 但丰度在不同时期有明显差异。介形虫丰度变化基本上与浮游、底栖有孔虫的丰度变化趋势同步(图 4): 总体上, 丰度在 MIS 13–10 期很低, 平均值仅为 0.4 瓣/g, 而在 MIS 9 期之后显著升高, 平均达到 4.3 瓣/g。MIS 10 期之后, 介形虫丰度的高值出现在间冰期的 MIS 9、7、5、3、1 期, 低值则出现在冰期的 MIS 8、6、4、2 期。微体化石在间冰期多、冰期少的变化趋势在北冰洋似乎是普遍规律<sup>[17, 30, 36–38]</sup>。影响北冰洋沉积物中方解石质微体化石丰度的因素有若干个, 包括沉积速率、溶蚀作用、生物生产力等; 这些因素中, 生物生产力似乎是最重要因素, 因为本研究(图 4)和以往的研究<sup>[30]</sup>都说明介形虫丰度与氧同位素曲线之间存在着非常好的相关性。本研究结果也证明了北冰洋 > 2000 m 水域底栖动物的生产力与较浅水域一样, 受冰期–间冰期冷暖变化的影响。

在 MIS 13–10 期, 介形虫和底栖、浮游有孔虫丰度均呈现显著的低值现象。在年代较老的地层中, 溶蚀作用可能会损耗更多的介形虫壳体, 造成丰度降低的假象, 但是我们认为在 B84A 中并不存在这种可能性, 理由有两个: 首先, 介形虫壳体保存状态在 MIS 9 期之前和之后没有可辨识的差异, 而且壳体相对较薄且易碎的 *Polycope* spp. 在 MIS 12–11 期也有较高的百分含量(图 4), 说明介形虫化石群在这一时期的保存条件一直是良好的; 第二, 沉积速率在 MIS 13–10 期(平均 0.42 cm/ka)和 MIS 9–1 期(平均 0.37 cm/ka)之间没有明显差别。因此, 有孔虫和介形虫在 MIS 13–10 期的低丰度现象, 可能是该时期海洋古生产力显著降低的真实反映。当然, 这一推测尚有待北冰洋中部晚第四纪总有机碳分析数据的佐证。

*Acetabulastoma arcticum* 是北冰洋常年海冰的指示种。图 4 显示 *A. arcticum* 在 MIS 13–10 期几近缺失, 在孔深 116 cm 处(对应 MIS 9 期)开始较多地

出现, 因此 MIS 9 期很可能是常年海冰在罗蒙诺索夫脊以西最早出现的时期, 正如 Cronin 等<sup>[30]</sup>所指出的那样。然而, 尚难以解释为何在常年海冰不存在的 MIS 13–10 期, 由有孔虫和介形虫所代表的海洋古生产力反而降低了。MIS 9 之后, *A. arcticum* 在冰期里(MIS 8、6、4 期)非常稀少甚至缺失, 但在间冰期(MIS 9、7、5、3 期)通常占了介形虫总个体数的 5% 以上, 最高达到 > 30%。在北冰洋中部<sup>[18]</sup>和西部<sup>[30]</sup>岩芯记录中, 我们发现 *A. arcticum* 具有与 B84A 岩芯中相同的分布方式, 即间冰期出现、冰期消失, 说明该种及其寄主只能生活在常年海冰和季节性海冰共存的间冰期, 而不能生活在洋面完全冻结的冰期环境。

#### 3.2.2 各属种百分含量与古水团变迁

B84A 岩芯中, 占优势的介形虫属种是 *Polycope* spp. (AIW 指示种) 和 *Cytheropteron sedovi* (AODW 指示种)。MIS 13 期以来, 这两个属种的百分含量曲线几乎呈镜像对称, 二者呈负相关关系且发生了 4 次较大的转折, 据此可以将岩芯记录分为 5 段, 即 MIS 13–12 期、MIS 11–10 期、MIS 9–MIS 5 早期、MIS 5 中–晚期以及 MIS 4–1 期。伴随着以上两个优势属种的此消彼长, 其他 6 个与水团相关联的常见种(*C. scoresbyi*, *C. higashikawai*, *M. medistriatum*, *Pseudocythere caudata*, *Pedicythere* spp. 以及 *Henryhowella asperrima*) 的百分含量也相应发生了显著变化(图 4, 表 3)。5 个时期中, 各属种的分布及其与水团变迁的关系简要描述如下。

MIS 13–12 期(约 533~424 ka): *Polycope* spp. 和 *Cytheropteron sedovi* 百分含量皆约为 40%, 相当于这两个属种在现代北冰洋 2 000~3 000 m 水深(即 AODW 上部)的含量。这一时期, AODW & AIW 指示种 *Cytheropteron scoresbyi* 也出现, 但是含量较低(平均 4.3%)。

MIS 11–10 期(约 424~337 ka): *Cytheropteron sedovi* 丰度升至 60%~90%, 而 *Polycope* spp. 降至约 20%, 相当于这两个属种在现代北冰洋 > 3 000 m 水深(即 AODW 下部)的百分含量。这一时期 *Cytheropteron scoresbyi* 的含量也较高(平均 12.8%)。

MIS 9–MIS 5 早期(约 337~100 ka): *Cytheropteron sedovi* 降至 10%~20%, *Polycope* spp. 升至 60%~80%, 相当于处在现代北冰洋 1 000~2 000 m 的 AIW 中。另一个 AIW 指标种 *Pseudocythere caudata* 在这一时期的含量也达到最高(平均 2.6%)。

MIS 5 中–晚期(约 100~71 ka): *Polycope* 从 > 60% 降到不足 10%, 而 *Cytheropteron sedovi* 从约 10% 增

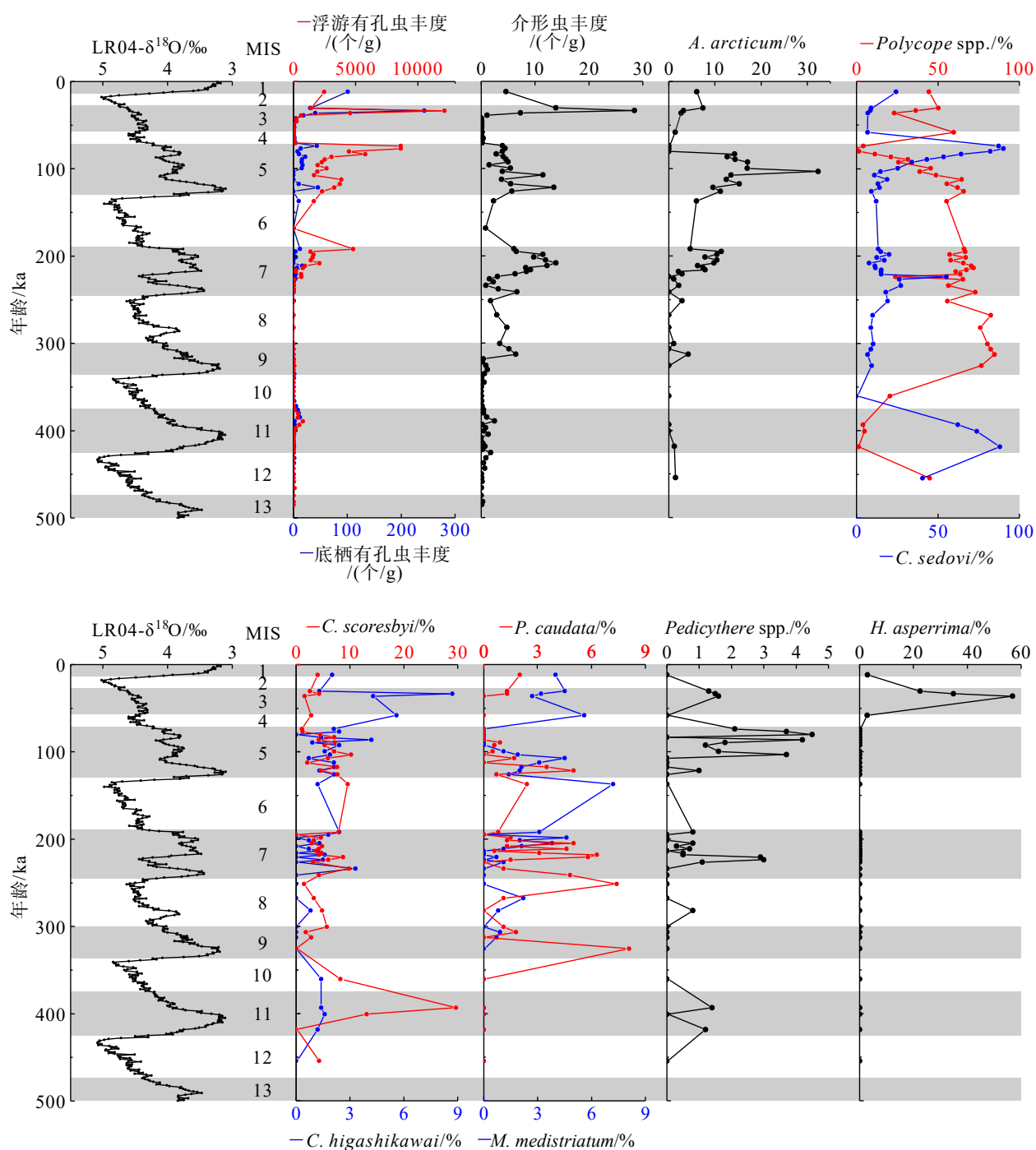


图 4 B84A 岩芯中有孔虫、介形虫丰度及介形虫主要属种百分含量变化  
年代框架和有孔虫丰度值引自 Wang 等<sup>[27]</sup>。

Fig.4 Foraminiferal and ostracode abundances, and relative frequencies (%) of key ostracode taxa in core B84A  
Chronological framework and foraminiferal abundance data are from Wang et al.<sup>[27]</sup>

加到 90%, 显示 AODW 下部 (>3000 m) 的水团快速上涌。这一时期里, AIW 指示种 *Pseudocythere caudata* (平均 0.9%) 和 *Pedicythere* spp. (平均 1.7%), AIW & AODW 指示种 *Microcythere medistriatum* (平均 1.1%) 和 *Cytheropteron scoresbyi* (平均 5.4%), 以及 AODW 下部指示种 *Cytheropteron higashikawai* (平均 1.8%) 也出现, 但是数量都很少。

楚科奇海台介形虫化石群的记录显示, MIS 5 中-晚期时, 在西北冰洋中层水域 (<1000 m) 曾发生过水团上涌事件: 下方的 AIW 向上迁移, 占据了原本属于 AW 的空间<sup>[17]</sup>。本研究则揭示了同一时期北冰洋中部更深水域 (>2000 m) 的水团变迁: AODW 向上迁移, 将盘踞于此的 AIW 排挤了出去。MIS 5 中-晚期的水团上涌事件, 在罗蒙诺索夫

表3 B84A岩芯中介形虫主要属种指示的水团及其在各时代的百分含量

Table 3 Correspondence of ostracode taxa with water masses, and their relative frequencies (%) in different times as recorded in core B84A

种名	对应的水团	MIS 13-12	MIS 11-10	MIS 9-6	MIS 5	MIS 4-1
<i>Polycope</i> spp.	AIW	44.9	7.7	66.4	34.1	42.8
<i>Cytheropteron sedovi</i>	AODW下部	40.6	71.7	15.9	40.1	11.4
<i>Microcythere medistriatum</i>	AIW&AODW	0	0	1.3	1.1	4.0
<i>Pseudocythere caudata</i>	AIW	0	0	2.6	0.9	0.9
<i>Pedicythere</i> spp.	AIW	0	0.5	0.5	1.7	0.9
<i>Henryhowella asperrima</i>	AODW上部	0	0	0	0	24.0
<i>Cytheropteron scoresbyi</i>	AODW&AIW	4.3	12.8	4.4	5.4	3.1
<i>Cytheropteron higashikawai</i>	AODW下部	0	1.4	0.7	1.8	4.4

脊以西的中层和深层水域可能是联动发生、同时进行的。本研究结果丰富了我们对于北冰洋深层水团变迁的认知,同时也印证了此前的研究结论<sup>[17]</sup>的可信度。

MIS 4-MIS 1期(约71 ka至今): *Polycope* spp. 含量逐渐恢复到20%~60%, *Cytheropteron sedovi* 则降到约20%,相当于处在现代北冰洋2000~3000 m的AODW上部。这一时期AODW上部指示种 *Henryhowella asperrima* 首次出现并且其含量达到了很高值(平均24.0%)。

综上,本研究通过分析来自阿尔法脊的一根岩芯中的介形虫化石群,重建了北冰洋中部深层水团自MIS 13期以来所经历的下沉—上涌—下沉的变迁过程,同时也揭示了古海冰消长和古生产力变迁历史。本研究再次证明介形虫是北冰洋古海洋环境的有用指标,研究结论有待更多的北冰洋微体化石记录以及地球化学指标来进一步证实。

## 4 结论

(1)由介形虫所代表的底栖生物古生产力在MIS 13-10期很低,进入MIS 9期之后显著升高;在MIS 9期之后,古生产力随气候冷暖交替而增减,间冰期的生产力通常显著高于冰期。

(2)海冰指示种 *Acetabulastoma arcticum* 在B84A岩芯中的分布,表明常年海冰很可能是在MIS 9期之后才出现的。

(3)基于AIW指示种 *Polycope* spp.和AODW指示种 *Cytheropteron sedovi* 百分含量而重建的阿尔法脊约2280 m水深处水团变迁历史如下: MIS 13-12期,处于AODW上部; MIS 11-10期, AODW下部上涌,取代了AODW上部; MIS 9-MIS 5早期,上方

的AIW下潜,取代了AODW; MIS 5中-晚期, AODW下部快速上涌,将AIW排挤出去;最终在MIS 4-1期,水团定格在AODW上部。其他几个常见种的百分含量变化与上述结论互不矛盾或互为印证。

**致谢:** 本研究使用的岩芯由“雪龙号”科考船所采取。中国极地研究中心样品库为本研究提供了岩芯样品。感谢同济大学张灵敏博士在SEM照片拍摄过程中给予的指导;感谢上海交通大学章陶亮博士在绘制本文插图时给予的帮助。

## 参考文献 (References)

- [1] Rudels B. Arctic Ocean circulation, processes and water masses: a description of observations and ideas with focus on the period prior to the International Polar Year 2007-2009 [J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 132: 22-67.
- [2] Aagaard K, Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1989, 94(C10): 14485-14498.
- [3] Anderson L G, Björk G, Holby O, et al. Water masses and circulation in the Eurasian Basin: results from the Oden 91 expedition [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C2): 3273-3283.
- [4] Jones E P. Circulation in the Arctic Ocean [J]. *Polar Research*, 2001, 20(2): 139-146.
- [5] Rudels B, Jones E P, Schauer U, et al. Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters [J]. *Polar Research:Oceans*, 2004, 23(2): 181-208.
- [6] Rudels B, Anderson L G, Jones E P. Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1996, 101(C4): 8807-8821.
- [7] Beszczynska-Möller A, Woodgate R A, Lee C M, et al. A synthesis of exchanges through the main oceanic gateways to the Arctic Ocean [J]. *Oceanography*, 2011, 24(3): 82-99.

- [8] Steele M, Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1998, 103 (C5): 10419-10435.
- [9] Holmes R M, McClelland J W, Peterson B J, et al. A circumpolar perspective on fluvial sediment flux to the Arctic Ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16 (4): 1098.
- [10] Aagaard K, Coachman L K, Carmack E. On the halocline of the Arctic Ocean [J]. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1981, 28 (6): 529-545.
- [11] Giles K A, Laxon S W, Ridout A L, et al. Western Arctic Ocean freshwater storage increased by wind-driven spin-up of the Beaufort Gyre [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (3): 194-197.
- [12] Proshutinsky A, Krishfield R, Toole J M, et al. Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018 [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2019, 124 (12): 9658-9689.
- [13] Comiso J C. Large-scale characteristics and variability of the global sea ice cover [M]. //Thomas D N, Dieckmann G S. *Sea Ice: An Introduction to Its Physics, Chemistry, Biology and Geology*. Chapter 4. Oxford: Wiley-Blackwell, 2003: 112–141.
- [14] Haley B A, Frank M, Spielhagen R F, et al. Influence of brine formation on Arctic Ocean circulation over the past 15 million years [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 68-72.
- [15] Cronin T M, Dwyer G S, Farmer J, et al. Deep Arctic Ocean warming during the last glacial cycle [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 631-634.
- [16] Gemery L, Cronin T M, Briggs Jr W M, et al. An Arctic and Subarctic ostracode database: biogeographic and paleoceanographic applications [J]. *Hydrobiologia*, 2015, <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2587-4>.
- [17] Zhou B C, Wang R J, Xiao W S, et al. Late Quaternary paleoceanographic history based on ostracode records from the Chukchi Plateau, western Arctic Ocean [J]. *Marine Micropaleontology*, 2021, 165: 101987.
- [18] Poirier R K, Cronin T M, Briggs Jr W M, et al. Central Arctic paleoceanography for the last 50 kyr based on ostracode faunal assemblages [J]. *Marine Micropaleontology*, 2012, 88–89: 65–76.
- [19] Gemery L, Cronin T M, Poirier R K, et al. Central Arctic Ocean paleoceanography from ~50 ka to present, on the basis of ostracode faunal assemblages from the SWERUS 2014 expedition [J]. *Climate of the Past*, 2017, 13 (11): 1473-1489.
- [20] 周保春, 王汝建, 梅静. 末次冰消期后大西洋水进入楚科奇海台: 来自介形虫化石群的证据 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35 (3): 73-82. [ZHOU Baochun, WANG Rujian, MEI Jing. The spreading of Atlantic Water onto Chukchi Plateau after Last Deglaciation: evidence from fossil ostracods [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35 (3): 73-82.]
- [21] 张海生. 中国第三次北极科学考察报告 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009. [ZHANG Haisheng. *The Report of 2008 Chinese Arctic Research Expedition* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.]
- [22] Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C07003.
- [23] Niessen F, Hong J K, Hegewald A, et al. Repeated Pleistocene glaciation of the east Siberian continental margin [J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 842-846.
- [24] Jakobsson M, Nilsson J, Anderson L, et al. Evidence for an ice shelf covering the central Arctic Ocean during the penultimate glaciation [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10365.
- [25] Yasuhara M, Stepanova A, Okahashi H, et al. Taxonomic revision of deep-sea Ostracoda from the Arctic Ocean [J]. *Micropaleontology*, 2014, 60 (5): 399-444.
- [26] Schlitzer R. Ocean Data View [EB/OL]. (2022-03-04). <http://odv.awi.de>.
- [27] Wang R J, Polyak L, Xiao W S, et al. Late-Middle Quaternary lithostratigraphy and sedimentation patterns on the Alpha Ridge, central Arctic Ocean: Implications for Arctic climate variability on orbital time scales [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 181: 93-108.
- [28] Lisiecki E, Raymo E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA1003.
- [29] Cronin T M, Holtz Jr T R, Stein R, et al. Late Quaternary paleoceanography of the Eurasian Basin, Arctic Ocean [J]. *Paleoceanography*, 1995, 10 (2): 259-281.
- [30] Cronin T M, Polyak L, Reed D, et al. A 600-ka Arctic sea-ice record from Mendeleev Ridge based on ostracodes [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 79: 157-167.
- [31] Joy J A, Clark D L. The distribution, ecology and systematics of the benthic Ostracoda of the central Arctic Ocean [J]. *Micropaleontology*, 1977, 23 (2): 129-154.
- [32] Jones R LI, Whatley R C, Cronin T M, et al. Reconstructing late Quaternary deep-water masses in the Eastern Arctic Ocean using benthonic Ostracoda [J]. *Marine Micropaleontology*, 1999, 37: 251-272.
- [33] Sars G O. Oversigt af Norges marine Ostracoder [J]. *Forhandlinger I Videnskabs-Selskabet I Christiania*, 1866, 1865 (1): 1-130.
- [34] Cronin T M, DeNinno L H, Polyak L, et al. Quaternary ostracode and foraminiferal biostratigraphy and paleoceanography in the western Arctic Ocean [J]. *Marine Micropaleontology*, 2014, 111: 118-133.
- [35] Cronin T M, Gemery L, Briggs Jr W M, et al. Quaternary sea-ice history in the Arctic Ocean based on a new ostracode sea-ice proxy [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (25-26): 3415-3429.
- [36] Polyak L, Curry W B, Darby D A, et al. Contrasting glacial/interglacial regimes in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Mendeleev Ridge [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 203 (1-2): 73-93.
- [37] Spielhagen R F, Baumann K H, Erlenkeuser H, et al. Arctic Ocean deep-sea record of northern Eurasian ice sheet history [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 1455-1483.
- [38] Adler R E, Polyak L, Crawford K A, et al. Sediment record from the western Arctic Ocean with an improved Late Quaternary age resolution: HOTRAX core HLY0503-8JPC, Mendeleev Ridge [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 68: 18-29.